文章编号： 1007-4627(2024) 03-0001-08

一种高计数率的能损探测器方案研究

卢奋华[1,2]，唐述文[1,2]，傅圣威[1,2]，闫铎[1]，马朋[1,2]，杨海波[1,2]，余玉洪[1,2]，章学恒[1,2]，王世陶[1,2]，张永杰[1]，方芳[1]，刘拓琦[1,2]，徐颖锋[1,2]，李治F[1,2]，刘相满[1,2,3]，魏啸宝[1,4]，孙志宇[1,2]

(1. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 兰州大学，兰州 730000；
4. 河南师范大学，新乡 453007)

摘要： 正在建设中的强流重离子加速器装置 HIAF 配备了一条先进的放射性束流线 HFRS，建成后将为中国高能放射性核束物理研究提供新的机遇。HFRS 的特点是流强极高 (初级束流强度 1×10^{11} ppp)，这对用于粒子鉴别的能损探测器提出了非常高的计数率要求。传统的能损探测器对信号处理一般依次采用电荷灵敏前放、主放、ADC 的技术路线。该方案存在电子学响应速度较慢、灵活性较差、难以处理高计数率下信号堆积严重等问题。我们对此提出一种新的适用于高计数率的能损探测器方案：以耐辐照的多次取样电离室为能损探测器，优化结构和读出方式提高探测器响应速度，使用快电荷灵敏前放对能损探测器信号初步放大后、直接用波形数字化仪采集波形再进行后续数字算法处理。并利用放射源和束流对该方案进行了验证测试。利用 3 组分 α 源测试时，对采集的波形使用数字成形算法处理，能量分辨率（FWHM）可达 1.31%。在 RIBLL2 提供 300 MeV/u 的 ^{56}Fe 束流测试中，采用时间常数 $\tau_f = 2\ \mu s$ 的快电荷灵敏前放在计数率接近 1 MHz 时仍未发生明显堆积。

关键词： HFRS；电离室；高计数率；快电荷灵敏前放；波形采样；数字成形算法
中图分类号： O571.53 **文献标志码：** A **DOI：** 10.11804/NuclPhysRev.32.01.01

1 引言

放射性核束物理自上世纪八十年代创立以来，就是核科学最具活力的前沿研究领域。世界主要的核物理实验室利用放射性束流装置，在探索原子核的存在极限、弱束缚核的奇特结构、壳结构的演化以及奇特核反应机制研究等方面取得了重大进展，极大地推动了核物理的发展[1-6]。然而随着研究的目标原子核越来越远离 β 稳定线，放射性次级束流的产额快速降低，现有的装置逐渐不能满足核物理研究的需求。因此，世界各大科技强国纷纷升级或新建大型重离子综合研究装置，如德国的 FAIR[7]、法国的 SPIRAL2[8]、美国的 FRIB[9] 和中国的 HIAF[10] 等，这些装置的共同特点是拥有先进的新一代弹核碎裂型放射性束流线、典型流强可达 10^{11} ppp(particles per period)、能大大拓展核物理的研究范围。利用这些装置，人们期待能够发现更多激动人心的新现象和新物理。

正在建设中的 HIAF 装置配备了一条高能放射性束流线 HFRS[11]，其具有高入射束流能量 ($^{238}U^{34+}$ 能量为 800 AMeV) 及高流强 (初级束流强度 1×10^{11} ppp) 的特点。HFRS 采用了弹核碎裂型次级束流装置上常用的 $B\rho - TOF - \Delta E$ 方法实现粒子鉴别，即通过调节束流线的磁刚度 $B\rho$，可以进行碎片粒子的初步筛选，再通过测量粒子的飞行时间 TOF 和能损 ΔE，实现对不同粒子的鉴别。其中，实现原子序数 Z 鉴别的关键是能损探测器。为了满足 HFRS 上各类核物理实验的需求，要求能损探测器在次级束流强度超过 1 MHz 时仍能长时间稳定工作，且对 Z≤92 以内的粒子实现较好的鉴别。这对能损探测器的计数率性能以及能量分辨率性能提出了非常严苛的要求。

核物理实验中常用的能损探测器有半导体探测器（主要是硅探测器）、闪烁体探测器与气体电离室。其中半导体探测器受尺寸限制一般无法将面积做大，闪烁体探测器的能量分辨率性能很难满足粒子鉴别的需求，且二者的抗辐照性能均较差，当受到强辐射后性能将迅速变差[12]。气体电离室由于抗辐照性能强、价格便宜、不受尺寸限制，非常适合要求探测器灵敏面积较大或耐辐照性较能强的场合。特别是多次取样电离室 (MUltiple Sampling Ionization Chamber ,MUSIC) 由于可以通过多次

收稿日期： 2024-02-27； **修改日期：** 2024-02-27
基金项目： 国家自然科学基金资助项目（12375186）
作者简介： 卢奋华（1998–），男，广东惠州人，硕士研究生，从事核电子学与核探测技术；E-mail: lufenhua@impcas.ac.cn
通信作者： E-mail: tangsw@impcas.ac.cn

取样，显著提高气体电离室的能量分辨率，逐渐成为中高能粒子探测中最佳的能损测量探测器，并在多家实验室中得到了成功应用[13-15]。

MUSIC 探测器一般依次采用电荷灵敏前放、主放、ADC 的传统技术方案。然而由于受探测器结构、电子学及数据获取系统死时间的影响，目前常规的 MUSIC 在高计数率下难以正常工作，不能满足 HFRS 的要求。因此，急需研究可以承受高计数率的新 MUSIC 探测技术。

2 MUSIC 探测技术与计数率

MUSIC 探测器通常由阴极、栅极和多个阳极组成；在阴极至栅极的区域被称为漂移区，栅极至阳极的区域被称为收集区。如图 1，探测器工作时，束流粒子入射至探测器灵敏体积内使工作气体电离产生电子和阳离子对；在电场的作用下，电子和阳离子分别向阳极与阴极漂移；漂移的同时在读出电极上产生感应电流信号。然而，当束流入射位置不同时，电子的漂移距离会有所不同，导致感应电流信号的持续时间也不同，使得信号幅度与束流入射位置相关。MUSIC 通过采用栅极隔离电场的方法解决了这个问题，只有电子穿过栅极才能在阳极感应出信号，此时栅极-阳极固定的间距可令感应电流信号的持续时间基本一致，从而消除了信号幅度与束流入射位置的相关性。另外，阳离子会向阴极漂移并被收集，它们不会穿过栅极。因此，栅极还能屏蔽阳离子对阳极信号的干扰。这是 MUSIC 探测器能量分辨率好的原因之一。然而，由于栅极的屏蔽作用，电子在漂过栅极之前，不会在阳极上产生感应信号，这是由探测器结构带来的死时间，一般在微秒量级，这是影响 MUSIC 探测器计数率的因素之一。

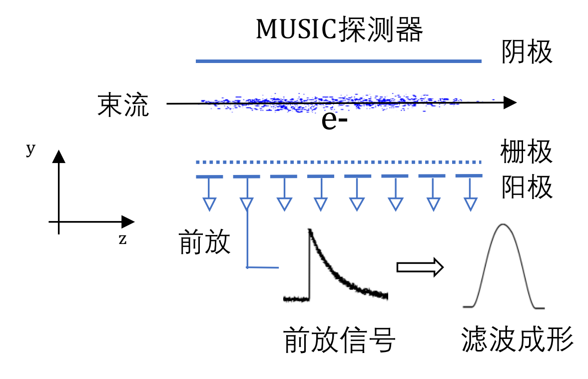


图 1 (在线彩图) MUSIC 探测器与读出信号图

而影响 MUSIC 探测器的能量分辨率的因素有：电离的电子离子对的统计涨落（本征分辨率）、电子的收集效率、探测器和电子学噪声、以及 ADC 道分辨率等。其中噪声是除统计涨落外对能量分辨率影响最大的因素。抑制噪声、提高信噪比是获得好能量分辨率的必要途径，一般选用低噪声、高增益的电荷灵敏前置放大器（简称前放）对信号进行初步放大。为了减少弹道亏损得到较好的能量分辨率，一般选用较长衰减时间的前放，这将导致前放信号的下降沿较长。然后为了进一步提高信号的信噪比，通常把前放信号输入至主放大器中进行滤波、成形、放大，主放的成形时间一般也在微秒量级。当计数率升高时，容易出现信号堆积现象，影响探测器的能量分辨率。因此，电子学响应速度慢是影响 MUSIC 探测器计数率的另一个因素。

最后，主放的输出信号送入 ADC 中进行幅度采集，通常需要一个外部触发信号逐事件进行数据获取，触发信号可选用束流穿过 MUSIC 探测器的时间，即电离作用发生的时刻 t_0。根据电离位置的不同，电子漂过栅极所用的时间也有差别。因此，阳极信号的产生与 t_0 时刻存在 Δt 的时间差，且因电离位置不同，Δt 值存在微秒量级的晃动。此外，考虑到主放信号的峰位需设置在 ADC 的门信号内，ADC 的门信号宽度至少应设置为好几微秒，参考图 2。这是常规 MUSIC 探测器计数率最多能只达到几百 kHz 的原因。

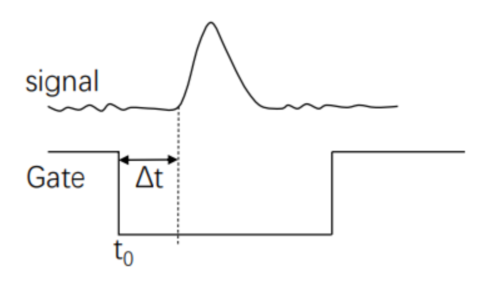


图 2 常规 MUSIC 探测器利用 ADC 采集信号时门与信号的关系

为了提高 MUSIC 的计数率，国际同行们做了各种努力。德国 GSI 将 MUSIC 的工作气体替换成电子漂移速度更快的为 CF_4，以减少探测器自身的死时间，并通过优化电荷灵敏前放与主放的成形时间，将计数率提高至 200 kHz[16]。日本 RIKEN 将 MUSIC 的电极改为导电的薄膜平面，并使电极与束流成一定倾斜角，由于不带栅极，可使电离电子一开始漂移就在阳极上产生感应信号，从而消除探测器自身的死时间，再利用双极成形主放消除阳离子的影响，可以将计数率提高至 1 MHz[17]。然而该方案存在两方面弊端，首先该探测器结构是以牺牲能量分辨率为代价来提升计数率的，其次，后续电子学响应速度依然慢，易发生信号堆积。只是采用了堆积拒绝的方式使探测器在较高计数率下仍然能保持较好的能量分辨率，但事实上这是以降低有效计数率为代价的。当计数率为 320 kHz 时，堆积事件占 40%，而当计数率

为 1 MHz 时，堆积事件达到了 75%[17]。采用堆积拒绝的方式后，在很大程度上造成了束流的浪费。

3 高计数率方案

影响能损探测器计数率的主要因素总结下来有：MUSIC 的栅极结构导致探测器响应慢、电荷前放较大的时间常数导致信号下降沿较长并容易产生堆积、外触发模式需设置好几微秒宽的 ADC 的门信号符合获取，触发死时间大。对此，我们提出一种高计数率能损探测器方案：①优化 MUSIC 探测器结构，减小信号上升沿时间；②使用快电荷灵敏型前置放大器缩短信号下降沿时间；③放弃使用主放，并使用自触发模式利用波形数字化技术直接对前放的输出波形进行采样；④最后开展后续算法处理。

3.1 探测器结构优化

探测器结构方面：调整减小收集区间距，这可以更快地收集电子，减少前放信号的上升沿时间。如图3所示：随着收集区间距不断减小，电子能被更快地收集，信号上升沿时间缩短。

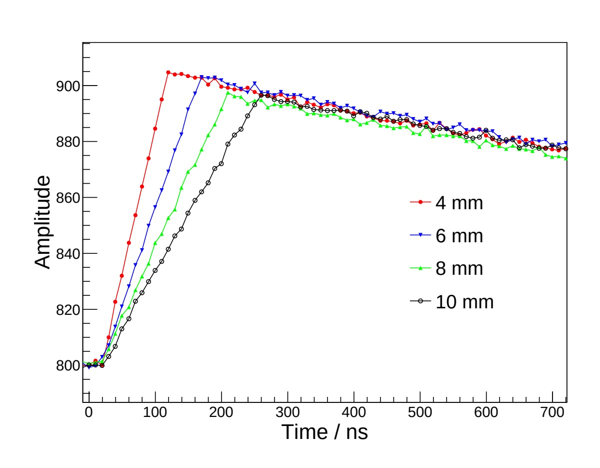
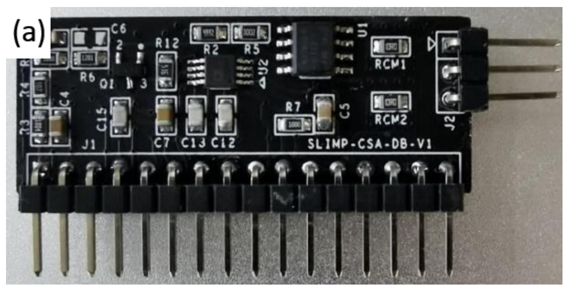


图 3　(在线彩图) 不同收集区间距的信号上升沿对比图

但同时，减小收集区间距也代表着探测器制作工艺难度的上升以及栅极对漂移区电场屏蔽效果变差。因此，可以均衡探测器工艺与栅极屏蔽电场情况，把 MUSIC 的收集区间距尽量减小。

3.2 快电荷灵敏前放

高计数率方案使用的快电荷灵敏前置放大器见图 4a，它是由中国科学院近代物理研究所针对 MUSIC 探测器研制的一种低噪声、高增益快电荷灵敏型前放。主要在信号输入端加入了 JFET（场效应晶体管），优点是输入电阻比较大，输入偏置电流比较小，电流噪声小。并在前放电源处加了由电阻电容组成的滤波电路、对 PCB 大面积铺铜但不全铺、为噪声提供低阻抗回路这几种措施得到了低噪声、高增益的快电荷前放。它的反馈电容 C_f 与泄放电阻 R_f 的乘积—时间常数 $\tau_f = R_f C_f$ 较小，使得前放反馈电容通过电阻放电将变得更快，从而信号下降沿宽度变窄，堆积发生的几率减少。如图 4b 的波形所示：明显可以看出，前放的时间常数 τ_f 越小，信号下降沿能够越快恢复至基线。其不足之处在于带来更大的弹道亏损，当前放输入的感应电流形状不同时，弹道亏损会影响能量分辨率。为解决这个问题，可以在 MUSIC 上增加阴极读出，利用阴极-阳极二维能谱关联图可以对弹道亏损进行修正[18]。



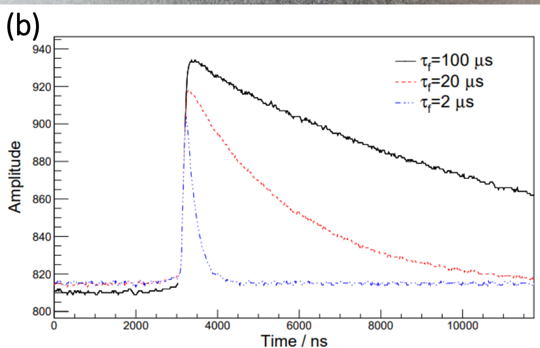


图 4　(在线彩图)(a) 电荷灵敏前置放大器、(b) 不同时间常数的前放信号

3.3 波形数字化

近年来，随着高速采样 ADC 及 FPGA 技术的快速发展，波形数字化技术在核物理实验中得到了越来越广泛的应用[19]。信号波形携带了探测器最原始、最详细的信息，通过分析波形，可以提取各种想要的信息。

高计数率方案利用波形数字化技术直接对前放的输出波形进行采样，放弃使用主放。其优势有：数字化后的信号不再受后级电路噪声干扰；波形数字化技术支持自触发方式获取波形，可以消除图 2 中由于 ADC 门宽带来的死时间；在采集到了波形信息后，即使发生了堆积，还可以利用波形信息发展算法进行堆积修正。这种修正可以逐事件开展，不需要采用堆积拒绝的方式，可以大大提高束流的利用率。

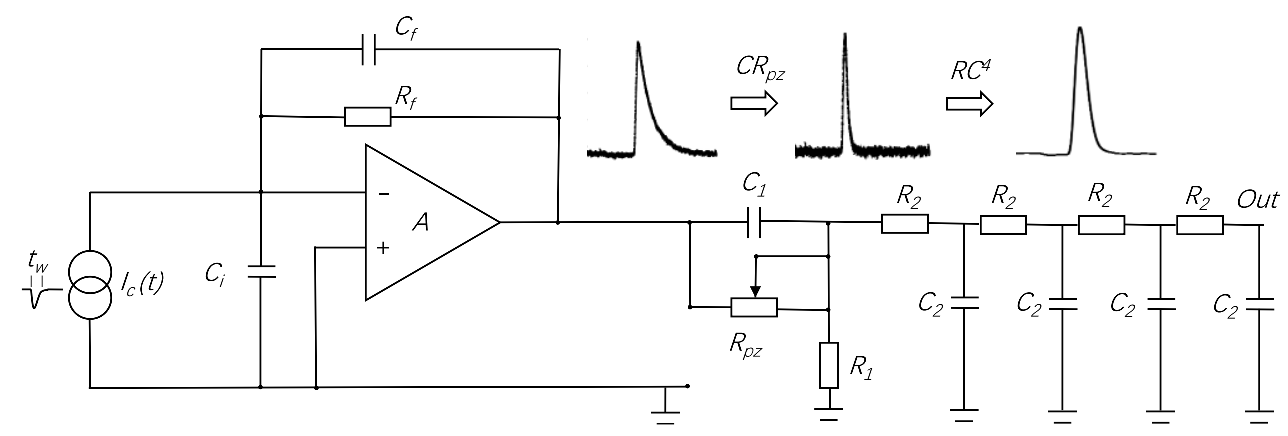


图 5 CSA-CR_{pz}-RC 电路与对应的 α 放射源信号处理图

3.4 数字成形算法

波形数字化后的数据可用数字成形算法进行后续处理。数字成形算法有不受模拟电路噪声影响、可实现难以用模拟元件实现的滤波器、参数易于调节的优点。例如计数率性能较好的三角成形算法、可补偿弹道亏损的梯形成形算法[20]、处理堆积信号的 HYPER 算法[21]。各种算法有其特点与适用性，下面介绍比较通用的主放电路 CR_{pz}-RC 数字算法。

3.4.1 CR_{pz}-RC 电路数字化

如图 5 所示，极零相消电路的输出电压 V_{PZ} 可视为 V_{CSA} 在 R_1 上的分压，分压比为 $\frac{R_1}{Z_C // R_{PZ} + R_1}$。其中 $Z_C = \frac{1}{SC}$ 为电容的 S 域模型，符号“//”表示并联。该分压比即为极零相消电路的传递函数 $H(S)$。令 $\tau_1 = R_{PZ} \cdot C_1$、$\tau_2 = (R_{PZ} // R_1) \cdot C_1$，整理后有:

$$H(S) = \frac{S + \frac{1}{\tau_1}}{S + \frac{1}{\tau_2}} \tag{1}$$

前放输出信号的下降沿由负指数函数描述，在 S 域可表示为：$V_{CSA}(S) = \frac{Q_{max}}{C_f} \cdot \frac{1}{S + \frac{1}{\tau_f}}$。由分压关系，极零相消输出 $V_{PZ}(S)$ 满足:

$$V_{PZ}(S) = \frac{Q_{max}}{C_f} \cdot \frac{1}{S + \frac{1}{\tau_f}} \cdot \frac{S + \frac{1}{\tau_1}}{S + \frac{1}{\tau_2}} \tag{2}$$

$$= \frac{Q_{max}}{C_f} \cdot \left(\frac{\frac{\tau_2 \cdot (\tau_f - \tau_1)}{\tau_1 \cdot (\tau_f - \tau_2)}}{S + \frac{1}{\tau_f}} - \frac{\frac{\tau_f \cdot (\tau_2 - \tau_1)}{\tau_1 \cdot (\tau_f - \tau_2)}}{S + \frac{1}{\tau_2}} \right) \tag{3}$$

对上式作反变换可得极零相消电路在时域上的输出 $V_{PZ}(t)$:

$$V_{PZ}(t) = \frac{Q_{max}}{C_f} \cdot \left(\frac{\tau_2(\tau_f - \tau_1)}{\tau_1(\tau_f - \tau_2)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_f}} - \frac{\tau_f(\tau_2 - \tau_1)}{\tau_1(\tau_f - \tau_2)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \tag{4}$$

当 $R_{PZ} \to +\infty$ 时为 CR 微分电路，此时 $V_{PZ}(t)$:

$$V_{PZ}(t) = \frac{Q_{max}}{C_f} \cdot \left(\frac{\tau_f}{\tau_f - \tau_2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} - \frac{\tau_2}{\tau_f - \tau_2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_f}} \right) \tag{5}$$

当 $\tau_1 = \tau_f$ 时极零相消，此时 $V_{PZ}(t)$:

$$V_{PZ}(t) = \frac{Q_{max}}{C_f} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \tag{6}$$

根据节点电流定律 KCL（电荷守恒），极零相消电路的输出电压 V_{PZ} 满足:

$$\frac{V_{CSA} - V_{PZ}}{R_{pz}} + C_1 \cdot \frac{d(V_{CSA} - V_{PZ})}{dt} = \frac{V_{PZ}}{R_1} \tag{7}$$

经采样间隔 $dt = \Delta t$ 采样后，输入 $V_{CSA} = x[n]$、输出 $V_{PZ} = y[n]$ 变成离散化序列，代入上式整理后可得递推式[22]:

$$\begin{cases} y[n] = \frac{(1+k_1) \cdot x[n] - x[n-1] + y[n-1]}{1+k_1+k_2}, & n \geqslant 1 \\ y[n] = x[n] = 0, & n \leqslant 0 \end{cases} \tag{8}$$

其中: $k_1 = \frac{\Delta t}{R_{PZ} \cdot C_1}, k_2 = \frac{\Delta t}{R_1 \cdot C_1}$; 通过调节 k_1, 令 $\tau_1 = \tau_f$ 实现极零相消，调节 k_2 实现微分。

同理，根据 KCL 建立 RC 低通滤波器电路的微分方程，可得输入输出的递推式[23]:

$$\begin{cases} y[n] = (1 - k_3) \cdot x[n] + k_3 \cdot y[n-1], & n \geqslant 1 \\ y[n] = x[n] = 0, & n \leqslant 0 \end{cases} \tag{9}$$

其中 $x[n]$，$y[n]$ 分别为 RC 电路的输入与输出序列，$k_3 = \frac{R_2 \cdot C_2}{R_2 \cdot C_2 + \Delta t}$，调节 k_3 选择滤波成形参数。

前放信号经过式 (8)(9) 的迭代处理，即可实现 CR_{pz}-RC 算法。

4　验证测试

用兰州次级束流线 RIBLL2 上的多次取样电离室 MUSIC[15] 对方案进行测试。RIBLL2 的 MUSIC 采用了 mylar 膜作为入射窗与出射窗。阴极与栅极的漂移区高度为 90 mm、为缩短信号的上升沿时间，栅极与阳极的收集区高度优化调整为 4 mm、栅丝半径 0.1 mm、丝间距 2 mm。灵敏区域长 380 mm，分成了 8 个等间隙的阳极，每个阳极 45 mm，相当于 8 个小电离室串联。在中高能放射性束实验时，阳极分条后的 MUSIC 通过多次的小距离取样，可认为在每个阳极间能量损失率基本一致，即每个阳极的信号是独立取样的。则单次取样的不确定度能通过多次取样减小，以此提高能量分辨率[24]。若单次测量的能量分辨率为 σ_0，取样次数为 N，则最终的能量分辨率为 $\sigma = \sigma_0/\sqrt{N}$，实际可根据需要把阳极两两并联成 4 通道以增大信号幅度。

具体连接测试示意见图 6，将 MUSIC 读出阳极与快电荷前放 PreAmp 连接，对进行信号初步放大后，把波形信号送入波形数字化仪进行波形采样。为使接口匹配，电荷前放输出接口 PCle 经接口转换板 Adapter 转换为 LEMO 口输出。

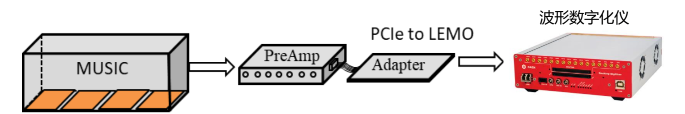
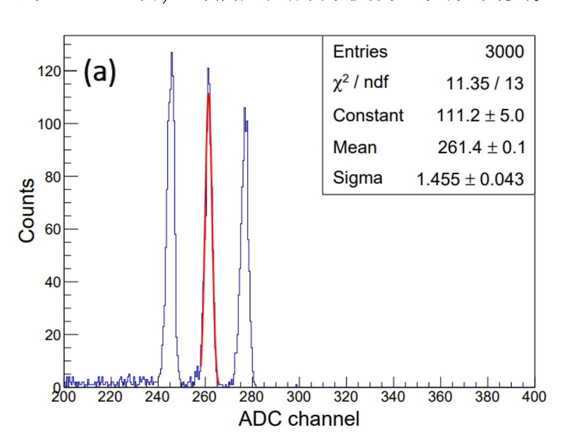


图 6　(在线彩图) MUSIC 连接测试示意图

4.1　能量分辨率测试

利用 3 组分 α 源 (^{239}Pu 5.16 MeV、^{241}Am 5.48 MeV、^{244}Cm 5.80 MeV) 对 MUSIC 进行测试，α 源贴在阴极的光阑上，经光阑准直后朝第一个阳极取样单元发射。工作气体使用 P10(90%Ar+10%CH_4)，采用流气工作模式使 MUSIC 工作在常压下。阳极、阴极信号经快电荷前放引出。阴极加负高压-2940 V、栅极电压-166 V、阳极接地。采用 Tektronix 的 MSO 5204B 示波器进行波形采样，该示波器具有采样率高，动态范围可调的优点。将快电荷前放的信号接入示波器进行数据采集，对采集的波形使用主放模拟电路数字化后的 CR-RC^4 成形算法：选取前放信号前 1000 个数据点的平均值作为基线，将整个波形数据扣除基线使基线回归至 0 道址。调节 k_1、k_2、k_3 令 CR_{pz} 与 RC^4 的成形参数一致，此时滤波效果较好。如图 5 所示，从左至右分别为前放原始信号、CR_{pz} 微分高通滤波与极零相消信号、RC^4 积分低通滤波成形信号。最后，对成形后的信号选取峰值填谱，阳极能谱结果如图 7a 所示，阳极与阴极的二维关联能谱如图 7b 所示。

在使用 CR_{pz}-RC^4 数字成形算法后。阳极对 α 源 ^{241}Am 的能量分辨率为 1.31%，即单个阳极单元能量分辨率（FWHM）可达 1.31%。在理想情况下，由 $\sigma = \sigma_0/\sqrt{N}$，8 个小单元电离室串联组成的 MUSIC 最佳能量分辨率可达到 0.5% 左右，可满足大部分核物理实验需要。



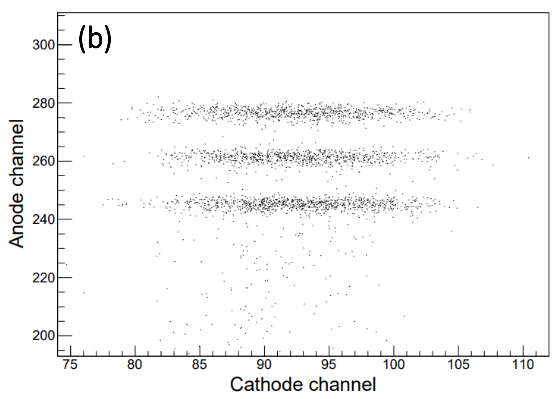


图 7　(在线彩图)(a) 三组分 α 源的阳极能谱、(b) 三组分 α 源对应的阳极-阴极能谱关联图

注意到，通过恰当地调节探测器工作电压，可令图 7b 中的阳极-阴极二维关联能谱图没有出现明显的相关性; 此时弹道亏损效应不显著，即使不修正，使用快电荷前放也有较好的能量分辨率。

4.2　计数率测试

为验证整体方案在高计数率下的性能，并对比不同时间常数的差异。利用兰州次级束流线 RIBLL2 提供 300 MeV/u 的 ^{56}Fe 束流测试 MUSIC，探测器的工作条件与放射源测试完全相同。阳极接地并引出信号，为增大信号幅度提高信噪比，把 8 个阳极单元两两并联成 4 个通道，每个通道束流沉积能量均为 26.3 MeV。4 个通道引出的信号经前放放大后送入波形数字化仪 DT5740 采集波形。

如图 8 所示，从上至下分别为时间常数为 100 μs、

20 μs、2 μs 的前放输出波形。可以看出，时间常数越小的前放通道越不容易发生信号堆积。其中 $\tau_{\mathrm{f}} = 2\ \mu s$ 快电荷前放通道在计数率接近 1 MHz 时依然未发生明显堆积，基线平稳。而 100 μs 与 20 μs 的通道发生了严重的堆积并很快超出 ADC 量程范围。从测试结果看，$\tau_{\mathrm{f}} = 2\ \mu s$ 的通道计数率有了大幅提升。

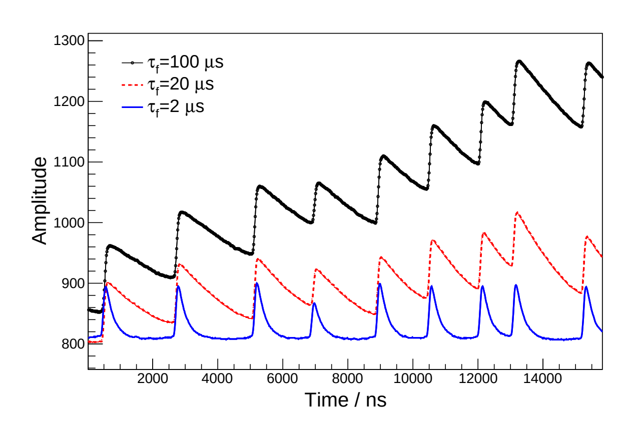


图 8 (在线彩图) 束流测试采集信号

4.3 测试结果讨论

从放射源与束流测试结果上看，使用快电荷前放加波形采样的方案是可行的，能量分辨率与计数率都达到了较好的效果。使用快电荷前放时，其可承受计数率明显优于普通前放，在能量分辨率方面相比于常规方案也无明显差别。实际上，实验选取时间常数大的电荷前放是为了减少前放电容放电，保证电荷收集，减少弹道亏损。如使用快电荷前放就会造成弹道亏损，能量分辨率变差。但对于多次取样电离室 MUSIC，见图 1：由于增加了栅极屏蔽，只有电离出的电子穿过栅极后才会在阳极产生感应电流；栅极到阳极的间距较小且固定，这使得束流产生的感应电流持续时间非常短并且持续时间一致、感应电流形状一致。使用快电荷前放时，电容放电相对较少、放电时间相同、总的放电比例相同（比例:$e^{-\frac{t_{\mathrm{w}}}{\tau_{\mathrm{f}}}}$，$t_{\mathrm{w}}$ 为感应电流持续时间）。此时脉冲幅度是线性减小的。此外，当输入感应电流形状不同时，弹道亏损还可以通过阳极-阴极关联能谱图进行修正。因此，快电荷前放在 MUSIC 的实验环境下是可行的，明显提高了计数率，但能量分辨率并不会受到影响。此外，当快电荷前放配合上波形采样与数字算法后，还极大地减少了探测系统的死时间。

5 总结

高能量分辨率的同时要求高计数率是困难的。为了满足 HFRS 装置建设，经过大量的尝试后，提出了一种适用于 HFRS 束流线上的高计数率能损探测器方案。介绍了方案使用的探测器与快电荷前放，并对整体方案做了束流与放射源实验验证。从测试的结果来看，在保证了能量分辨率的情况下，计数率上有了大幅提升。快电荷前放在束流测试下计数率接近 1 MHz 时仍未发生明显堆积，在使用 MSO 5204B 示波器进行波形采样并处理后，单个阳极单元能量分辨率（FWHM）可达 1.31%，可满足大部分核物理实验需要。因此高计数率能损探测器方案是可行的。下一步，将研究无触发的 DAQ 系统，配合自触发的波形采样，实现不同探测器系统间的数据同步与对齐。

参考文献

[1] URREGO-BLANCO J P, BINGHAM C R, BRANDT B V D, et al. Nuclear Instruments Methods in Physics Research, 2007, 261(1-2): 1112. DOI: 10.1016/j.nimb.2007.04.257.

[2] SORLIN O, PORQUET M G. Progress in Particle Nuclear Physics, 2008, 61(2). DOI: 10.1016/j.ppnp.2008.05.001.

[3] BAUMANN T, SPYROU A, THOENNESSEN M. Reports on Progress in Physics, 2012, 75(3): 036301. DOI: 10.1088/0034-4885/75/3/036301.

[4] CASTEN R, SHERRILL B. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2000, 45: S171. DOI: 10.1016/S0146-6410(00)00108-3.

[5] TANIHATA I, SAVAJOLS H, KANUNGO R. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2013, 68: 215. DOI: 10.1016/j.ppnp.2012.07.001.

[6] YE YanLin, YANG XiaoFei, LIU Yang HAN JiaXing.SCIENTIA SINICA Physica. 2020, 50(11) (in Chinese) DOI: 10.1360/SSPMA-2020-0282
(叶沿林、杨晓菲、刘洋、韩家兴. 中国科学：物理学、力学、天文学, 2020, 50(11): 10.)

[7] SPILLER P, FRANCHETTI G. Nuclear Inst Methods in Physics Research A, 2006, 561(2): 305. DOI: 10.1016/j.nima.2006.01.043.

[8] GALES S. Progress in Particle Nuclear Physics, 2006, 59(1): 22. DOI: 10.1016/j.ppnp.2006.12.021.

[9] THOENNESSEN M. Nuclear Physics, 2010, 834(1-4): 688c. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2010.01.125.

[10] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, 317: 263. DOI: 10.1016/j.nimb.2013.08.046.

[11] B L N S A, B X H Z A, B J Q Z A, et al. Nucl Instr and Meth B, 2020, 469: 1. DOI: 10.1016/j.nimb.2020.02.026.

[12] KRANER H W. Nuclear Instruments Methods in Physics Research, 1984, 225(3): 615. DOI: 10.1016/0167-5087(84)90114-5.

[13] CHRISTIE W B, ROMERO J L, BRADY F P, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 1987, 255(3): 466. DOI: 10.1016/0168-9002(87)91213-7.

[14] BAUER G, BIESER F, BRADY F P, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 1997, 386(2-3): 249. DOI: 10.1016/S0168-9002(96)00883-2.

[15] ZHANG X H, TANG S W, MA P, et al. Nuclear Instruments Methods in Physics Research, 2015, 795(sep.21): 389. DOI: 10.1016/j.nima.2

015.06.022.

[16] STOLZ A, FAESTERMANN T, KOERNER H J, et al. GSI Report, 1998, 33.

[17] KIMURA K, IZUMIKAWA T, KOYAMA R, et al. Nuclear Inst Methods in Physics Research A, 2005, 538(1-3): 608. DOI: 10.1016/j.nima.2004.08.100.

[18] LIU J, JIANG H, CUI Z, et al. Nucl Instr and Meth A, 2021, 1014: 165751. DOI: 10.1016/j.nima.2021.165751.

[19] ZHANG Honghui, YANG Haibo, LI Liangrong ,et al.Nuclear Physics Review. 2023, 40(86-91) (in Chinese) DOI: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022076
(张洪辉, 杨海波, 李良荣, 等. 原子核物理评论, 2023, 40(86-91).)

[20] VALENTIN, T., JORDANOV. Nucl Instr and Meth A, 2003, 505(1-2): 347. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01094-5.

[21] LIU J, LI H, WANG Y, et al. Real time digital implementation of the high-yield-pileup-event-recover (hyper) method[C/OL]//IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2008. DOI: 10.1109/NSSMIC.2007.4437051.

[22] JIAN-BIN Z, XU H, REN-BO W, et al. 核技术：英文版, 2014(1): 5. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.010403.

[23] ZHANG H Q, LI Z D, TANG B, et al. 核技术：英文版, 2019, 30(7): 5. DOI: 10.1007/s41365-019-0638-7.

[24] TANG Shuwen，DUANG Limin, SUN Zhiyu, et al.Nuclear Physics Review. 2012, 29(1) (in Chinese) DOI: 10.11804/NuclPhysRev.29.01.072
(唐述文, 段利敏, 孙志宇, 等. 原子核物理评论, 2012, 29(1): 5.)

A high count rate energy loss detector plan research

LU Fenhua[1,2], TANG Shuwen[1,2], FU Shengwei[1,2], YAN Duo[1], MA Peng[1,2], YANG Haibo[1,2], YU Yuhong[1,2], ZHANG Xueheng[1,2], WANG Shitao[1,2], ZHANG Yongjie[1], FANG Fang[1], LIU Tuoqi[1,2], XU Yingfeng[1,2], LI Zhiyao[1,2], LIU Xiangman[1,2,3], WEI Xiaobao[1,4], SUN Zhiyu[1,2]

(*1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
4. Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: The high-intensity heavy-ion accelerator facility (HIAF) under construction is equipped with an advanced radioactive beam line HFRS, which will provide a new opportunity for the research of high-energy radionuclide beam physics in China.The characteristic of HFRS is high intensity, This puts forward very strict requirements for particle recognition energy loss detector.The traditional energy loss detector generally adopts the analog plug-in technology route of preamplifier, main amplifier and ADC for signal processing.This scheme has some problems, such as slow electronic response, poor flexibility and difficulty in dealing with serious pulse pile-up at high count rate. We propose a new applicable to high count rate energy loss detector scheme.The signal of the energy loss detector is initially amplified by the fast charge sensitive preamplifier, and Then the waveform is directly collected by waveform digitizer and then processed by digital algorithm.And use the Multiple Sampling Ionization Chamber (MUSIC) of secondary beam line of lanzhou RIBLL2 for the radioactive source and beam test.Using the 3 components α source test, using digital shaping algorithm processing for acquisition of waveform, energy resolution (FWHM) of up to 1.31%.In RIBLL2 provide 300 MeV/u of ^{56}Fe beam test, uses the time constant of $\tau_f = 2\ \mu s$ of fast charge sensitive preamplifier on the count rate is close to 1 MHz is still not occurred pulse pile-up obviously.

Key words: HFRS; Ionization chamber; High count rate; Fast charge sensitive preamplifier; Waveform sampling; Digital shaping algorithm

Received date: 27 Feb. 2024; **Revised date:** 27 Feb. 2024
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (12375186)
Corresponding author: TANG Shuwen, E-mail: tangsw@impcas.ac.cn